Метрологические исследования. Поиски, новые решения

УДК 539.125.52:621.384.654

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ НГ-24М СТЕНДА НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ «ГНЦ ТРИНИТИ»

В. Д. Севастьянов, О. И. Коваленко, А. В. Орлов, Р.М. Шибаев, С.Ю. Обудовский*, Д.В. Портнов*, А.В. Батюнин*, Ю.А. Кащук*

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.,

e-mail:sevast@vniiftri.ru

* Троицкий институт инновационных исследований, Троицк, e-mail: S.Obudovsky [obud@triniti.ru], Y. kashchuk[y.kashchuk@iterrf.ru]

Нейтронно-активационным методом измерен спектр нейтронов вблизи мишени нового портативного нейтронного генератора НГ-24М. Восстановленный спектр нейтронов представлен в аналитической форме в виде суперпозиции известных физически обоснованных спектров. Представление восстановленного спектра в такой форме уменьшило систематическую погрешность определения спектра нейтронов источника и повысило достоверность его определения.

Spectrum of neutrons near the target of new neutron generator NG-24M was measured by neutron activation method. Spectrum of neutrons is represented in analytical form as superposition of physically substantiated spectra. Represented form of reconstructed spectrum reduce systematic error in measuring neutron source spectrum and increase the accuracy of the measurement.

Ключевые слова: спектр нейтронов, нейтронно-активационный метод, нейтронные характеристики

Источники моноэнергетических нейтронов с энергией 14 МэВ на базе электростатических ускорителей заряженных частиц нашли широкое применение в мировой практике нейтронных измерений для следующих целей: моделирования полей нейтронов разрабатываемых термо-ядерных исследования радиационного воздействия реакторов; нейтронного излучения с энергией 14 МэВ на исследуемые объекты гражданского и военного назначения; лечения онкобольных; градуировки нейтронной радиометрической аппаратуры [1-3] и др. Однако нейтронное излучение с энергией ~14 МэВ, вылетающее из мишенных блоков таких ускорителей, сопровождается также сопутствующим нейтронным излучением с энергией ~2 МэВ, генерируемым им в материале конструкционных элементов мишенных блоков в результате неупругого рассеяния (n,n'). Степень радиационного воздействия нейтронного излучения на исследуемые объекты определяется не только флюенсом, но и спектром нейтронов. Поэтому в настоящей работе было проведено тщательное исследование спектра нейтронов МОП(НГ-24М) вблизи мишенного блока

портативногогенератора нового типа, а именно генератора с отпаянной ускорительной трубкой НГ-24М (рис.1).



Рис. 1. Габаритный чертеж платформы генератора (вид сбоку), внешний вид нейтронной трубки генератора НГ-24М и ее размещение в экспериментальном зале

Измерение спектра и флюенса в МОП(НГ-24М) статического генератора НГ-24М проведены нейтронно-активационным методом. Так как плотность потоков нейтронов в МОП(НГ-24М) вблизи мишени генератора на расстоянии от нее ~ 100 мм (рис. 2) невысока 1·107 см⁻² · с-¹, то измерение спектра нейтронов проводили не только активационными, но и высокочувствительными трековыми делительными детекторами типа ДКН [2].

Поле нейтронов МОП(НГ-24М) вблизи мишени генератора преимущественно формируется моноэнергетическими нейтронами с энергией 14,80 МэВ. Они генерируются по реакции ³H+²H=⁴He+n в тритиевой мишени генератора, бомбардируемой ускоренными до энергии 200 кэВ дейтронами [4]. Угловая анизотропия вылета 14 МэВ – нейтронов, генерируемых в мишени по реакции T(D, n)³He при энергии ускоренных дейтронов ~200 кэВ, не превышает 5-6 % [5].

Альманах современной метрологии, 2016, №7



Рис. 2. Размещение исследуемых точек в аттестуемом поле генератора НГ24М

Кроме того, часть 14 МэВ – нейтронов испытывает неупругое рассеяние (n,n') в материале конструкционных элементов мишенного блока (медь, железо и т.д.), находящихся вблизи мишени мишенного блока генератора [6, 7]. Средняя энергия неупруго рассеяных нейтронов составляет ~2 МэВ. Третья часть ~14 МэВ-нейтронов упруго рассеивается на лёгких ядрах материала, входящего в состав мишенного блока. Например, охлаждающей мишенный блок жидкости. Кроме того, моноэнергетические ~14 МэВнейтроны упруго рассеиваются и на ядрах тяжёлых элементов (Cu, Fe), входящих в состав материала отдельных составляющих генератора, Нейтроны вблизи мишени блока. находящихся этой группы преимущественно рассеиваются вперёд в направлении ускоряемого пучка

дейтронов. Однако максимальная энергия, которую может потерять 14 МэВ–нейтрон в одном акте упругого рассеивания при этом ~300 кэВ. Они обуславливают разброс в энергии моноэнергетических 14 МэВ–нейтронов, а также приводят к незначительному снижению их максимальной энергии.

Для определения нейтронных характеристик [МОП(НГ-24М)] применен нейтронно-активационный метод с применением программы КАСКАД-620 [8-11]. Отличительной особенностью этого метода определения спектра, реализованного с применением программы КАСКАД, является то, что поиск исследуемого спектра нейтронов F(E) при его восстановлении может осуществляться в аналитической форме в виде суперпозиции парциальных физически обоснованных спектров: испарительных спектров (Вайскопфа); спектра замедления (Ферми); спектра тепловых нейтронов (Максвелла); спектра моноэнергетических нейтронов в форме распределения Гаусса; спектра нейтронов предварительно рассчитанного методом Монте-Карло:

$$F(E) = \sum_{i=1}^{K} A_{Bi} (\alpha_{Bi})^2 E \exp(-\alpha_{Bi} E) + A_M \alpha_M^2 E \exp(-\alpha_M E) + \frac{1}{1 + A_{\Phi} (1/E^{\alpha \Phi})} [1 + (10^{7}/E)^7]^{-1} [1 + (E/0,2)^2]^{-1} + \sum_{i=1}^{K} A_{\Gamma} 1/(\sigma_{\Gamma i} \sqrt{2\pi})^{-1} \exp[-(E_{\Gamma i} - \alpha_{\Gamma i})^2/2\sigma_{\Gamma i}], \qquad i=1 \qquad (1)$$

где $\alpha_{\rm B}$, $\alpha_{\rm M}$, α_{ϕ} и α_{Γ} – есть параметры, а $A_{\rm B}$, $A_{\rm M}$, A_{ϕ} и A_{Γ} – вклады указанных выше парциальных спектров рассчитываются из условия:

$$\int_{0}^{\infty} \phi(E) dE = 1 , \qquad (2)$$

где Е, МэВ - энергия нейтронов.

Физическое обоснованное представление искомого априорного спектра нейтронов по формуле (1) позволяет существенно уменьшить систематическую погрешность восстановления спектра нейтронов в полях нейтронов ядерно-физических установок. Измерение нейтронных характеристик в МОП(НГ-24М) генератора НГ-24М проводили на расстоянии 100 мм от тритиевого слоя мишени мишенного блока генератора в направлении ускоряемого до энергии 200 кэВ пучка дейтронов.

Количества ядерных реакций активации Qⁱ_a и деления Qⁱ_F в детекторах после их облучения нейтронами рассчитывали из соотношений: для активационных (а)

$$Q_{a}^{i} = A^{i} t \cdot t_{0} \{ N^{i}_{s} \cdot [1 - \exp(-\lambda^{i} \cdot t^{i} 0)] \cdot \exp(-\lambda^{t} \cdot t^{i} B) \}^{-1} ,$$
(3)

для делительных (F)

$$\mathbf{Q}^{i}_{\mathbf{F}} = N^{i}_{\mathbf{F}} \left(\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{F}} \cdot \mathbf{N}^{i}_{\boldsymbol{\beta}} \right)^{-1}, \tag{4}$$

где: A^{i}_{t} – активность *i*-го детектора на момент *t* времени его измерения, t^{i}_{0} – эффективное время облучения *i*-го детектора нейтронами, N^{i}_{s} – число ядер нуклида мишени в *i*-ом детекторе, λ^{i} – константа распада для продукта

активации в *i*-ом детекторе, t^i в – время выдержки детектора с момента конца времени его облучения нейтронами до момента времени измерения его активности, N^i _F – число зарегистрированных актов деления в *i*-ом детекторе за время его облучения нейтронами, ε_F – чувствительность регистрации актов деления в делительном детекторе.

Величину $\varepsilon_{\rm F}$ рассчитывали по соотношению [12, 13]:

 $\varepsilon_{\rm F} = \varepsilon 0 \ (1-t/2R),$

(5)

где: ε_0 -чувствительность регистрации осколков деления, вылетающих из слоя делящегося вещества в детекторе для стандартной системы «делительный детектор-регистратор осколков деления из слюды-мусковит ($\varepsilon_F = 0.915 \pm 0.005$)»; *t*-толщина слоя делящегося вещества в делительном детекторе ($\leq 0.5 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$); *R*- средний пробег осколков деления в слое делящегося вещества (в виде окиси, закиси) детектора ~10 мг см⁻².

Ядерно-физические характеристики, используемые в работе активационных и делительных детекторов нейтронов, приведены в табл.1.

P				таолица т
Ядерная реакция	Энергети-	Период	ү-излучение:	
	ческий	полураспада		эмиссия,
	порог	(погрешность)	энергия,	%
	реакции,		кэВ	(погреш-
	МэВ			ность)
93 Nb(n,2n) 92 mNb	9,0	10,15(2) сут.	934,44	99,07(4)
⁵⁸ Ni(n,p) ⁵⁸ Co	1,0	70,86(6) сут.	810,775	99,45(1)
⁵⁸ Ni(n,2n) ⁵⁷ Ni	12,7	35,60(6) час	1377,6	81,7(24)
115 In(n,n') 115 mIn	1,20	4,486(4) час	336,2	45,8(22)
$^{197}Au(n,\gamma)^{198}Au$	10-10	2,69517(21) сут.	411,8	95,58(12)
²³⁸ U(n,f) (ТДДН)	0,5		Осколки	деления
			ядра	
²³⁷ Np(n,f) (ТДДН)	~ 0,3		Осколки	деления
			ядра	
²³⁵ U(n,f) (ТДДН)	10-10		Осколки	деления
			ядра	

Энергетическая чувствительность к нейтронам использованного при измерениях спектра нейтронов набора детекторов лежит в диапазоне энергии 10⁻¹⁰ - 18 МэВ. Как отмечалось выше, регистрация осколков деления в делительных детекторах осуществлялась стандартизированными трековыми регистраторами из природной слюды-мусковит.

Для мониторирования поля нейтронов в МОП(НГ-24М) использован радиометр-монитор с Si-детектором, установленный в фиксированной геометрии вблизи мишенного блока генератора [14, 15]. Регистрация 14 МэВ Альманах современной метрологии, 2016, №7

-нейтронов в нем осуществляется по реакции ${}^{28}\text{Si}(n,\alpha){}^{26}\text{Mg}$, имеющей энергетический порог регистрации нейтронов ~5 МэВ. Сечение этой реакции при энергии 14,75 МэВ составляет $260 \pm 25 \text{ мб}$ [16].

Измерение наведенной активности в облученных нейтронами детекторах, проводили на радиометрическом комплексе Госэталона ГЭТ51-80 «Государственный первичный специальный эталон единиц плотности потока и флюенса нейтронов для ядерно-физических установок» [17]. В работе использовали спектрометр γ -излучения с полупроводниковым Gедетектором. При измерении скорости реакции ¹¹⁵In(n,n')¹¹⁵mIn учитывался вклад в измеряемую активность от мешающей сопутствующей реакции ¹¹⁵In(n,p)¹¹⁵Cd $\xrightarrow{\beta}$ ¹¹⁵mIn по методикам работ [18, 19]. Счёт треков от осколков деления в регистраторах из слюды-мусковит осуществлялся после их травления в 36-процентной фтористоводородной кислоте, промывки и просушки. Определение скорости ядерных реакций в делительных детекторах проводили по методике МИ 2071-2005 [20].

В процессе выполнения исследований МОП(НГ-24М) на генераторе НГоптимальный состав нейтронно-активационных 24M определен И делительных детекторов нейтронов, изготовлены активационные И делительные детекторы нейтронов, проведена аттестация детекторов по числу ядер нуклидов-мишеней основных и мешающих примесных нуклидов, проведено оптимальное по времени облучение указанных выше активационных и делительных детекторов в МОП(НГ-24М), проведены измерения наведенной активности облученных нейтронами активационных и делительных детекторов на радиометрическом комплексе госэталона ГЭТ 51-80 с погрешностью 2-4 % для доверительной вероятности 0,95. Облучение активационных и делительных детекторов в МОП(НГ-24М) проводили одновременно с регистрацией импульсов с радиометра-монитора Si-детектором. Определены также скорости ядерных реакций в с активационных и делительных детекторах, отнормированные на одно ядро нуклида-мишени в детекторе и на один отсчет радиометра-монитора и рассчитан с применением программы КАСКАД-620 многогрупповой энергетический спектр нейтронов на расстоянии 121 мм от тритиевого слоя мишени мишенного блока генератора нейтронов в направлении ускоряемого до энергии 200 кэВ пучка дейтронов.

В табл. 2 приведена система моделирующих физически обоснованных спектров, принятых при расчете спектра нейтронов в МОП(НГ-24М).

Дисперсия спектров Гаусса при расчете результирующего спектра нейтронов принималось равной 0,2 МэВ.

Таблица 2

Моделирующие физически обоснованные спектры принятые при	
восстановлении спектра нейтронов в МОП(НГ-24М)	

Ng	Моделирующие	Параметры	Вклад
	физически	αі при рас-	компонента в вос-
	обоснованные	чете по	становленный
	спектры	формуле (1)	спектр нейтронов,
			%
1	Максвелл	9,70·10 ⁻¹	20.973
2	Максвелл	$3,20.10^{7}$	0,0
3	Ферми	9,50·10 ⁻¹	0.00077
4	Гаусс	$0,475 \cdot 10^2$	39,526
4	Гаусс	$0,49 \cdot 10^2$	39,499

В табл. 3 приведены результаты измерения спектра нейтронов МОП(НГ-24). В частности, в колонке 5 приведены: количества ядерных реакций активации и деления, отнормированные на одно ядро нуклида-мишени и на один отсчет радиометра-монитора, измеренные и рассчитанные с использованием восстановленного спектра нейтронов и дифференциальных сечений ядерных реакций, имеющиеся в библиотеке программы КАСКАД, отличие в процентах в измеренных и рассчитанных сечениях для активационных и делительных детекторах, принятых в расчет при восстановлении спектра нейтронов МОП(НГ-24М).

Таблица 3

Тоб мм от мишенного олока тенератора нт -24м								
Ядерная	Толщина экрана из			Сечения ядерных				
реакция	-		Измерен-	реакций, барн				
			ные					
			количества					
	кадмия, мм	бора,	ядерных	Измерен-	Расчет-	Отличие,		
		г/см2	реакций,	ное	ное	%		
			·ядро ^{-1·}					
			имп ⁻¹					
⁵⁸ Ni(n,p) ⁵⁸ Co	1.0	0.0	1,32.10-21	2,90.10-1	2,91.10-1	0.5		
⁵⁸ Ni(n,2n) ⁵⁷ Ni	1.0	0.0	1,38.10-22	3,03.10-2	3,00.10-2	-0,8		
93 Nb(n,2n) 93	1.0	0.0	$1,73 \cdot 10^{-21}$	3,80.10-1	$3,78 \cdot 10^{-1}$	-0,6		
mNb			-			-		
²³⁷ Np(n,f)	1.0	0.0	1,02.10-20	2,24	2,28	2,0		
197 Au(n, γ)	0.0	0.0	7,19.10-23	1,58.10-2	$1,59 \cdot 10^{-2}$	0.5		
¹⁹⁸ Au			-					
115 In(n,n') ¹¹⁵	1.0	1.0	4,06.10-22	9,13·10 ⁻²	8,77.10-2	-1.6		
mIn								

Краткие результаты восстановления спектра нейтронов на расстоянии 100 мм от мишенного блока генератора НГ-24М

Флюенс нейтронов на 1 отсчет радиометра-монотора 4,56·10³нейтр · см⁻² импульс⁻¹, средняя энергия нейтронов в спектре <En>=12,15 МэВ, среднеквадратическое отклонение (СКО) – 1,23%. На рис. 3 приведена гистограмма измеренного спектра нейтронов МОП(НГ-24М).



Рис. 3. Гистограмма измеренного спектра нейтронов МОП(НГ-24М)

Из вышеизложенного можно видеть, что энергетический спектр нейтронов МОП(НГ-24М) на генераторе НГ-24М представлен в виде суперпозиции всего 5-ти парциальных спектров: спектра неупругого рассеяния, спектра упругого рассеяния Максвелла, спектра нейтронов замедления Ферми и спектров моноэнергетических нейтронов с энергиями 14,75 и 14,90 МэВ.

Из табл. 2 следует, что спектр нейтронов МОП(НГ-24М) восстановлен достаточно корректно, т.к. среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренных и рассчитанных скоростей ядерных реакций по всей совокупности использованных в работе детекторов составляет всего 1,23%.

Из результатов измерений также следует, что спектр нейтронов в МОП(НГ-24М) преимущественно формируется моноэнергетическими ~14 МэВ нейтронами (79,03%) и не упруго рассеянными нейтронами (20,97%).

По результатам измерений источник нейтронов с моделирующим опорным полем МОП(НГ-24М) на генераторе НГ-24М аттестован в качестве рабочего эталона второго разряда в соответствии с поверочной схемой ГОСТ 8.105-80.

Аттестованное поле нейтронов МОП(НГ-24М) генератора нейтронов НГ-24М обеспечивает возможность проведения градуировки, калибровки и

поверки нейтронной аппаратуры, используемой для целей термоядерных исследований.

Литература

- 1. Севастьянов В.Д., Маслов Г.Н., Ковальчук В.Д., Терешкин В.И., Литвин В.И., Игнатьев Г.Н. Исследование спектров генераторов нейтронов с энергией 14 МэВ// Приборы и техника эксперимента, № 3, 2006, с.5-13.
- Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Характеристики полей нейтронов. Источники мгновенных нейтронов деления и 14 МэВ – генераторы нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, специальные конвертирующие нейтронное излучение устройства. – Справочник в 2 томах, том №1.- Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2014, 339 с.
- 3. Обудовский С.Ю., Батюнин А.В., Севастьянов В.Д., Воробьев В.А., Кащук Ю.А. Метрологическое обеспечение нейтронных измерений на стенде диагностики плазмы// Измерительная техника, № 4, 2015, с.40-46.
- 4. Борисов Г.А., Васильев Р.Д., Шевченко В.Ф. Кинематические таблицы ядерных реакций (d, n) и (p, n). М.: Изд-во стандартов, 1974. 256с.
- 5. Физика быстрых нейтронов под. ред. В.И. Стрижика.- М,: Атомиздат, 1977, с. 254-265.
- 6. Физика быстрых нейтронов. Эксперименты и теория. Под. ред. Дж. Мариона и Дж. Фаулера. Перев. с англ. под ред. д.ф.-м.н. Н.А. Власова, т. 2, А., М., 1966, с. 37-54.
- 7. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. Перев. с анг. к.ф.-м.н. И.Л. Чихладзе и А.Д. Климова. Под редак. д.ф.-м.н. Л.А. Микаэляна и к.ф.-м.н. В.И. Лебедева. М., 1968, с. 41-43.
- 8. Маслов Г.Н., Севастьянов В.Д., Кошелев А.С. Метод расчёта спектров нейтронов по результатам измерений с интегральными детекторами реализованный в новой версии программы КАСКАД// Измерительная техника, № 5, 2003, с.58-62.
- 9. Таблицы рекомендуемых справочных данных ГСССД Р475 2010. Севастьянов В.Д., Кошелев А.С., Маслов Г.Н. Характеристики полей нейтронов. (Свидетельство №475 ОТ 22.09.2010):-Источники мгновенных нейтронов деления и 14 МэВ – генераторы нейтронов, исследовательские энергетические реакторы, И специальные конвертирующие нейтронное излучение устройства. - Справочник.-Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2007, - 654 с.: Деп. в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 22.09.2010 г., №872а -2010 кк.
- 10. МЕТОДИКА ГСССД МР182-2011 (Аттестат №182 от 03.05.2011). «Методика восстановления спектров нейтронов ядерных реакторов и нейтронных генераторов КАСКАД 200(176)» В.Д. Севастьянов, А.С. Кошелев. Росс. научно-техн. Центр информации по стандартизации,

метрологии и оценки соответствия.- М., 2011. 17 с., Деп. в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» №878а – 2011 кк, 03.05.2011г.

- 11. Кошелев А.С., Севастьянов В.Д. Метод оценки погрешности определения спектров полей нейтронов ядерно-физических установок// Приборы и техника эксперимента, №4, 2011, с. 1-7.
- Александров Б.М., Жерехов В.Г., Ламаев С.Л., Николаев В.А., Соловьёв С.М., Солошенков П.С., Севастьянов В.Д. Эффективность регистрации осколков деления твердотельными трековыми детекторами на основе слюды// Атомная энергия, 1980, в.4, т.48, с.252-253.
- 13. White P.H.// Nucl. Instrum. And Methods, 1970, v. 79, 1.
- 14. Клочкова Л.И., Ковригин Б.С., Курицин В.Н., Лаврова Н.С. Измерение флюенса быстрых моноэнергетических нейтронов по продуктам ядерных реакций в кремниевом полупроводниковом детекторе/ Материалы 3-го Всес. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях, ЦНИИатоминформ, 1983, Т.1, с 195-200.
- 15. Клочкова Л.И., Ковригин Б.С., Курицин В.Н. Сечения реакций (n, p), (n, np) на ядрах ²⁷Al, ²⁸Si, ⁵⁰Cr, ⁵⁴Fe, ⁵⁶Fe, ⁵⁸Ni и Ni при энергии нейтронов 14,1 МэВ/ Тез. докл. 5-го Всес. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. – М, НПО «ВНИИФТРИ», 1990, с. 155.
- 16. Бычков В.М., Манохин В.Н., Пащенко А.Б., Пляскин В.И. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами.- Справочник.- М.: Энергоиздат, 1982, с. 101.
- 17. Севастьянов В.Д., Коваленко О.И., Зеленов Д.А., Орлов А.В. Радиометрический комплекс с гамма-спектрометрами для измерения характеристик полей нейтронов ядерно-физических установок// Измерительная техника, № 3, 2013, с.44-50.
- 18. Воинов А.С., Лебедев Б.Л. Особенности использования реакции ¹¹⁵In(n,n')¹¹⁵mIn при измерении «жестких» спектров нейтронов/ 5-ое Всес. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. Тезисы докладов. – М.: НПО «ВНИИФТРИ», 1990, с.126-127.
- 19. Борташ А.И. Измерение скоростей реакций ¹¹⁵In(n,n')¹¹⁵mIn и 65Cu(n,2n) 64Cu в полях нейтронов с энергией 14 МэВ. 4-ое Всес. совещ. по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях,/ Тезисы докладов. М.: НПО «ВНИИФТРИ», 1985, с.72.
- 20. МИ 2071-2005. Реакторные нейтронные поля. Методика выполнения измерений с делящимися нейтронно-активационными детекторами с трековыми регистраторами осколков деления, М., 2005.

Альманах современной метрологии, 2016, №7